



Hidrogeología 1

Ing. Ximena Díaz, Ph.D.

Conceptos fundamentales

Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

- **Acuífero**: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que **circule** a través de ella con facilidad
- Requisito indispensable: roca porosa
- Materiales muy variados: gravas, arenas, granito con alta fracturación, calizas agrietadas, areniscas porosas poco cementadas

Conceptos fundamentales

Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

- **Acuicludo:** formación geológica que contiene agua en su interior, incluso hasta la saturación, pero no la transmite (no permite que circule) y por lo tanto no es posible su explotación.
- Ejemplo: los depósitos de limo o arcillas de cualquier origen. 1 m^3 de arcilla contiene más agua que el volumen de arcilla, pero está atrapada y no sale por gravedad => no podrá circular en el subsuelo

Conceptos fundamentales

Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

- **Acuitardo:** formación geológica que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmite muy lentamente, por lo que no es apto para la captación de aguas subterráneas
- Puede permitir recarga vertical de otros acuíferos, pudiendo ser importante
- Ej: arenas arcillosas, rocas compactadas con alteración/fracturación baja o moderada

Conceptos fundamentales

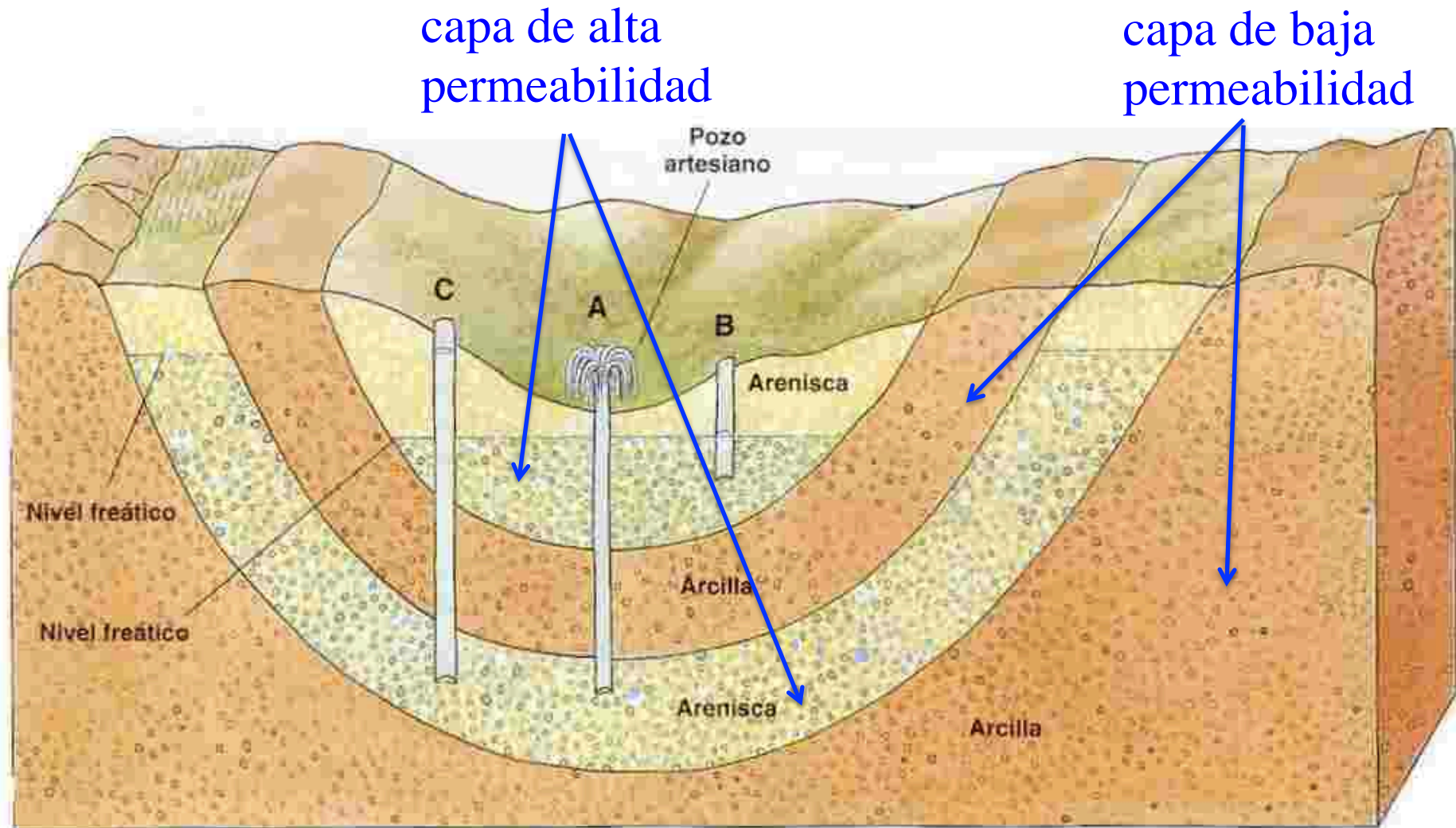
Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

- **Acuífugo:** formación geológica que no contiene agua ni la puede transmitir.
- Ejemplo: un macizo granítico que no esté fisurado o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación

NOTA: no son definiciones estrictas. Muchas en desuso. Puede incluir acuitardos

Dependerá de condiciones in-situ: En zonas secas será un acuífero, lo que en otras sea un acuitardo o acuífero pobre.

Conceptos fundamentales



Acuíferos

Conceptos fundamentales

- Un **acuífero** es una capa de sedimentos porosa y permeable impregnada de agua.
- De los cinco millones de kilómetros cúbicos de agua dulce subterránea que tiene el planeta, 30% (1.5 millones de km³) está almacenado en cientos de **mega acuíferos**: depósitos que contienen millones de litros y se extienden decenas de miles de kilómetros cuadrados.
- Los más grandes, casi todos ellos, debajo de las arenas de algún desierto.

Mega acuíferos

Los 10 acuíferos del planeta	Extensión en km ³	Consumo en km ³ /año	Edad en años
Areniscas de Nubia	2,500,000	15	20,000
Gran Cuenca Artesiana	1,750,000	16	5,000,000
Acuífero Guaraní	1,200,000	ínfimo	actual
Norte del Sahara	1,030,000	3	12,000
Cuenca de Taoudeni	800,000	ínfimo	fósil
Cuenca de Murzuk	700,000	ínfimo	32,000
Cuenca de Illurmenden	525,000	ínfimo	7,000
Acuífero de Ogallala	450,000	excesivo	actual
Canning-Officer	400,000	0.5	2,000,000
Acuífero Saudí	160,000	2	15,000

Los acuíferos pueden ser vivos y renovables (provenientes de lluvias), o fósiles (conservan agua de hace millones de años).

Mega acuíferos

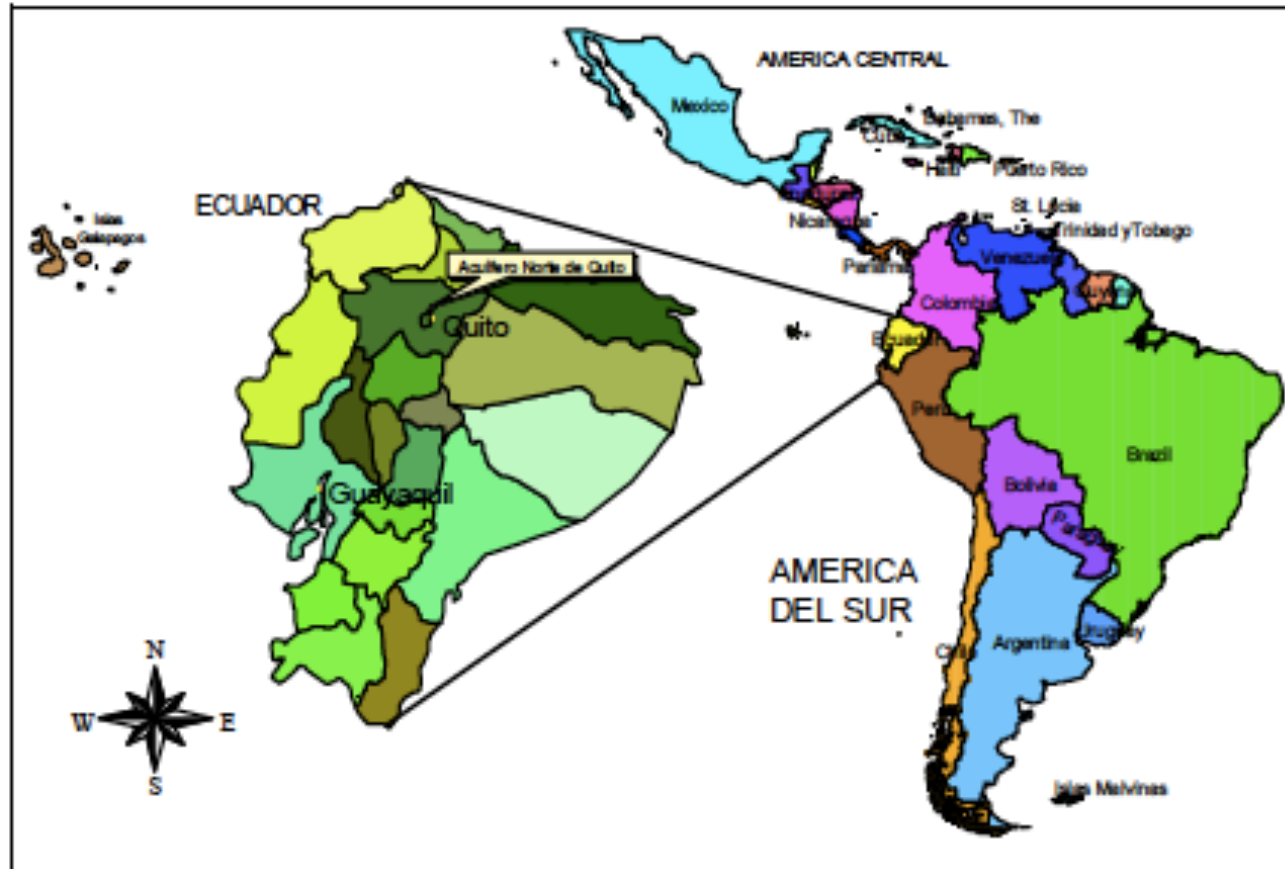


- Acuífero de Ogallala



Acuífero Guaraní

Acuífero de Quito



El área de estudio abarca 275 km² coincide con áreas ocupadas por la ciudad

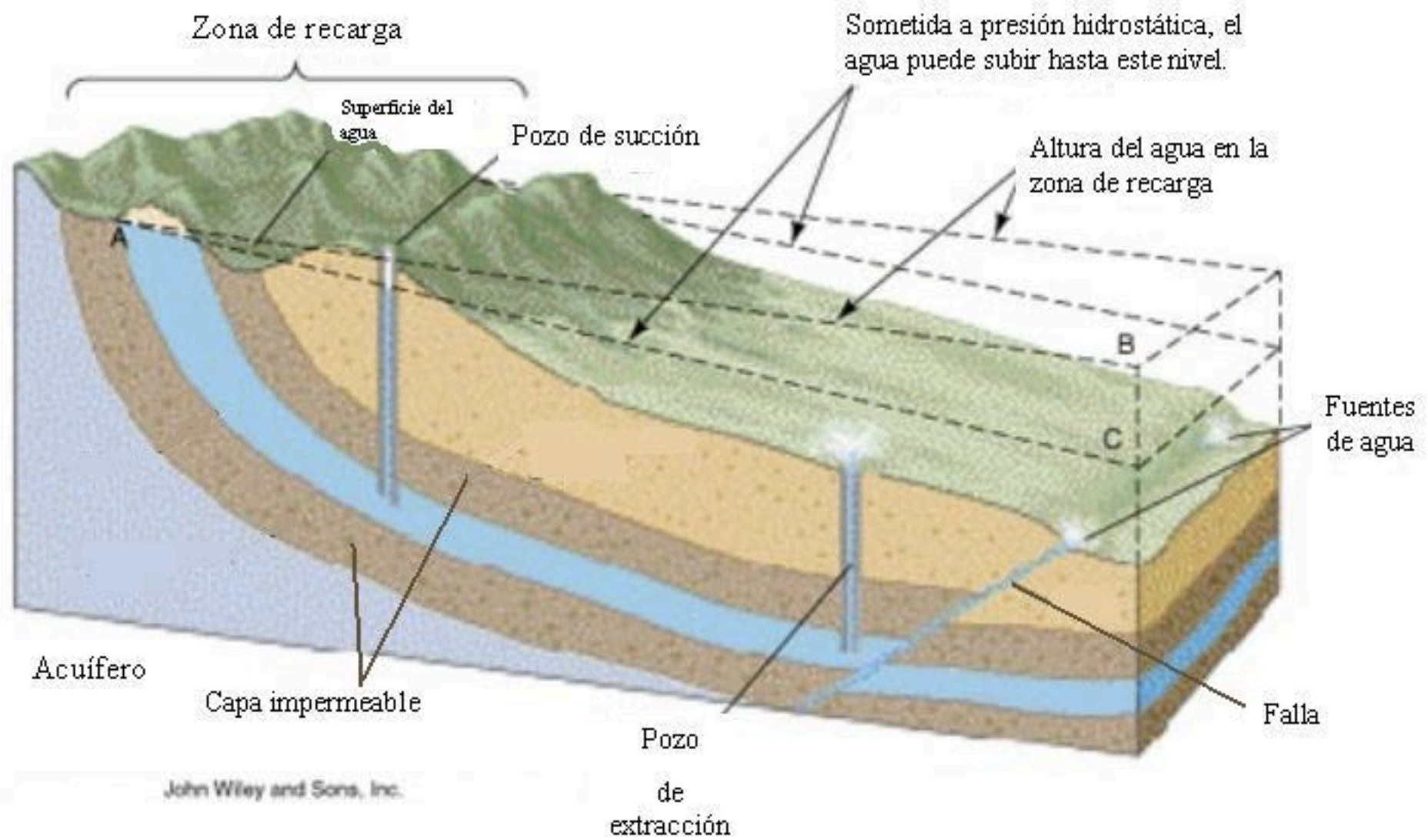
Quito tiene una gran reserva de agua subterránea

"La capital se edificó sobre una gran laguna, que empezaba en El Ejido y terminaba al norte del Aeropuerto", asegura Oscar Larrea, director del Proyecto Acuífero de Quito, plan que actualmente está en investigación.

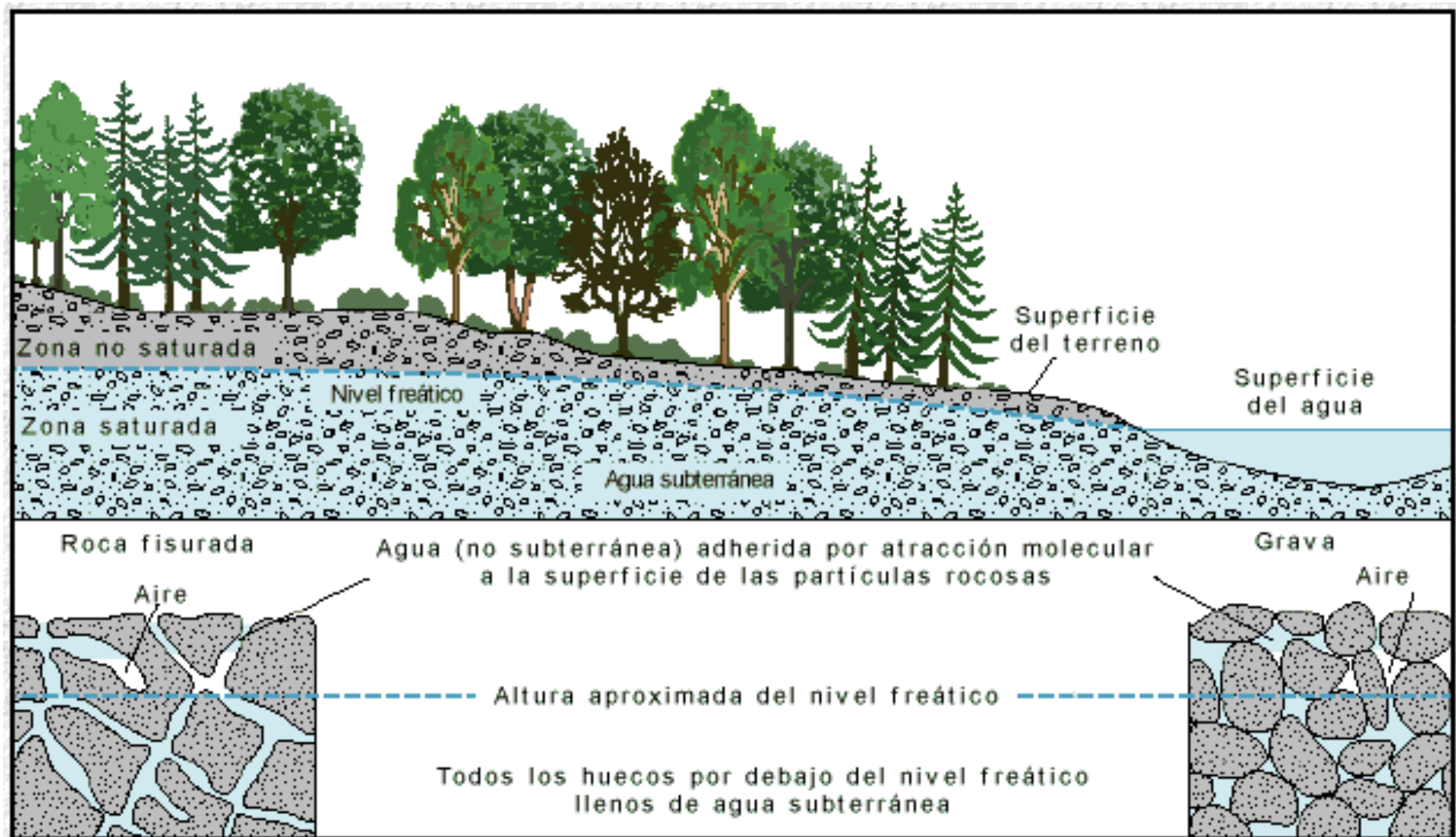
El acuífero está constituido por las aguas subterráneas que fueron extraídas hasta la mitad de los años 80 y que desde entonces se han almacenado.

En algunas zonas, las vertientes naturales están cerca de los cimientos de las edificaciones. El nivel del agua ha crecido 1,40 metros por año. En el caso del acuífero central que comprende la zona de La Carolina, La Jipijapa y el Aeropuerto, en 1990, el nivel de agua estaba a 30 metros de profundidad, ahora está a 7 metros.

Por ello es necesario extraer el agua para bajar esos niveles, y esta sería utilizada en emergencias naturales, cuando colapsen algunos de los sistemas de agua o se produzca una sequía.



Parámetros que influyen en el movimiento del agua



Parámetros que dependen del tipo de roca: **Porosidad**

- **Porosidad total:** la cantidad de huecos que tiene la roca.

$$m_t = V_{\text{huecos}} / V_{\text{total}}$$

- Se expresa como porcentaje en volumen (%) de roca total, o también como fracción de 1
- Ej: 28% = 0,28
- Una porosidad extremadamente baja podría ser 0,20%=0,002

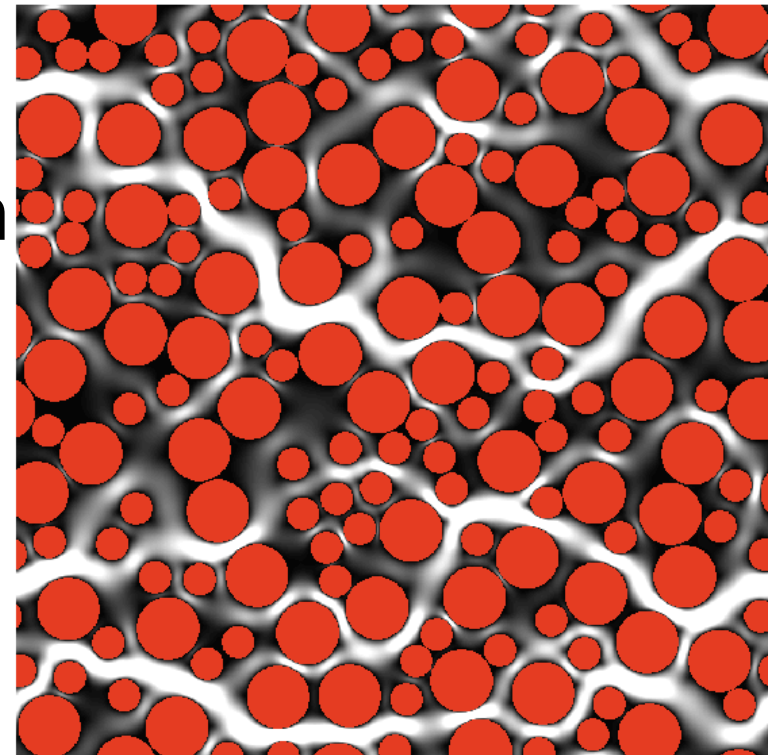
Porosidad

- **Porosidad Eficaz:** la cantidad de huecos interconectados.

$$m_e = V_{\text{agua drenada por gravedad}} / V_{\text{total}}$$

- Se expresa como % V de roca total, o como fracción de 1
- **Retención específica:** la diferencia entre las 2

$$R_e = m_t - m_e$$



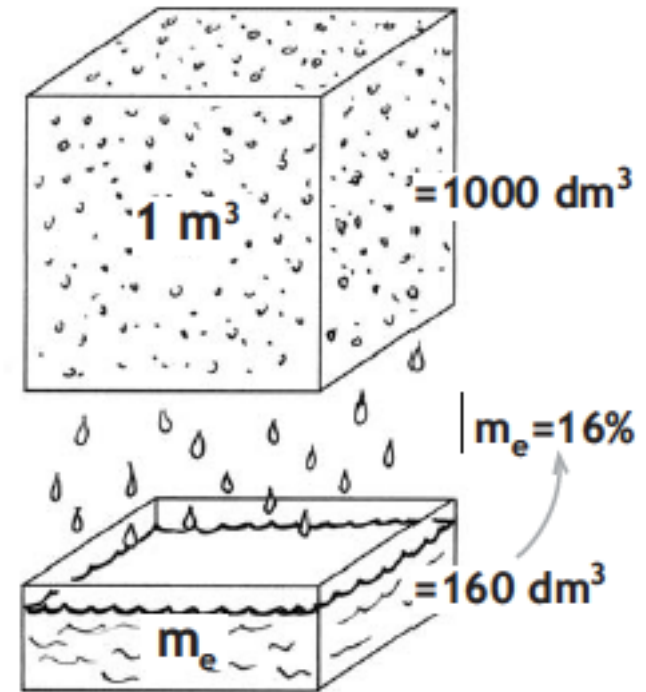
Porosidad

Ej: Se introduce 1 m³ de arena en agua hasta total saturación (todos los poros llenos de agua)

Suponer que se necesitaron 280 litros de agua

Se deja que agua escurra libremente. Suponer que se recogió 160 L de agua

Quedaron 120 L (280 L-160 L) retenidos en la arena, mojando los granos



$$1\text{m}^3 = 1000\text{ L}$$

$$m_t = 280/1000 = 0,28=28\%$$

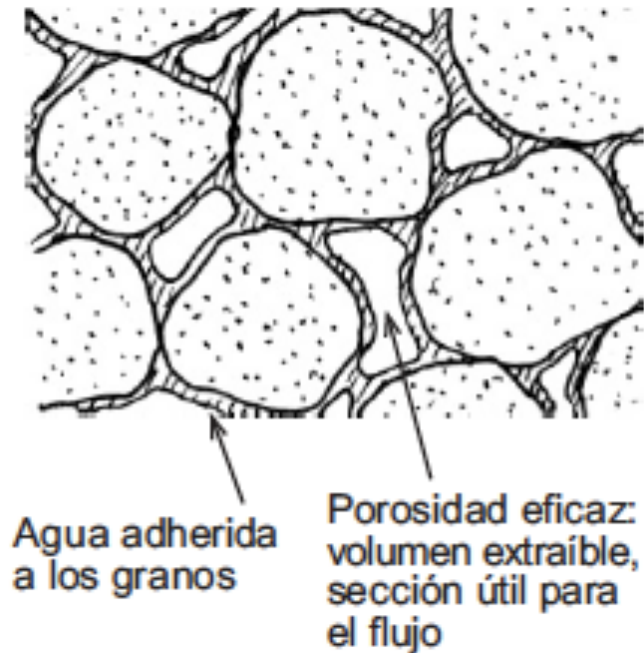
$$m_e = 160/1000 = 0,16=16\%$$

$$R_e = 0,28-0,16 = 0,12=12\%$$

Porosidad eficaz

Una definición más exacta sería:

- El volumen de huecos disponibles para el flujo respecto del volumen total



En USA se usa dos definiciones importantes (MODFLOW):

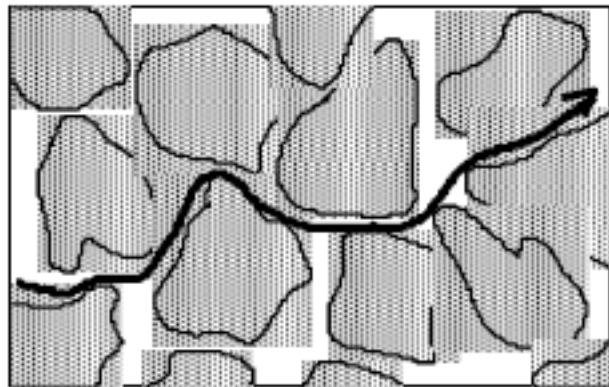
- Specific yield (rendimiento específico): Indica el volumen de agua que se puede obtener de un medio poroso saturado
- Effective porosity (porosidad efectiva): El volumen de huecos disponible para la circulación del agua

Son aproximadamente equivalentes: el agua adherida a los granos, no es recuperable y no circula

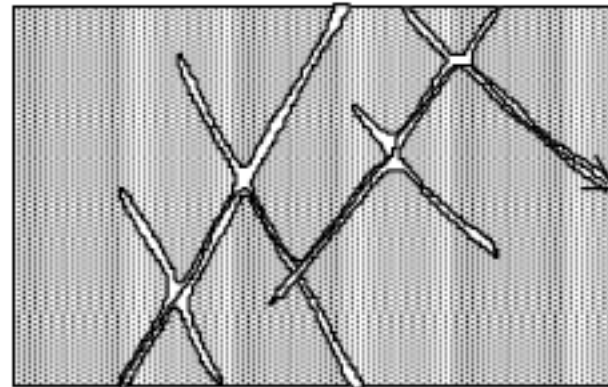
Porosidad primaria y secundaria

Hay dos tipos de porosidad:

- **Intergranular o primaria:** originada durante la formación geológica. La que ocurre entre granos.
- **Por fisuración o secundaria:** aberturas que ocurren con posterioridad a su formación geológica. Pe: conductos formados en calizas, o por enfriamiento (rocas volcánicas); planos de descompresión o discontinuidades sedimentarias

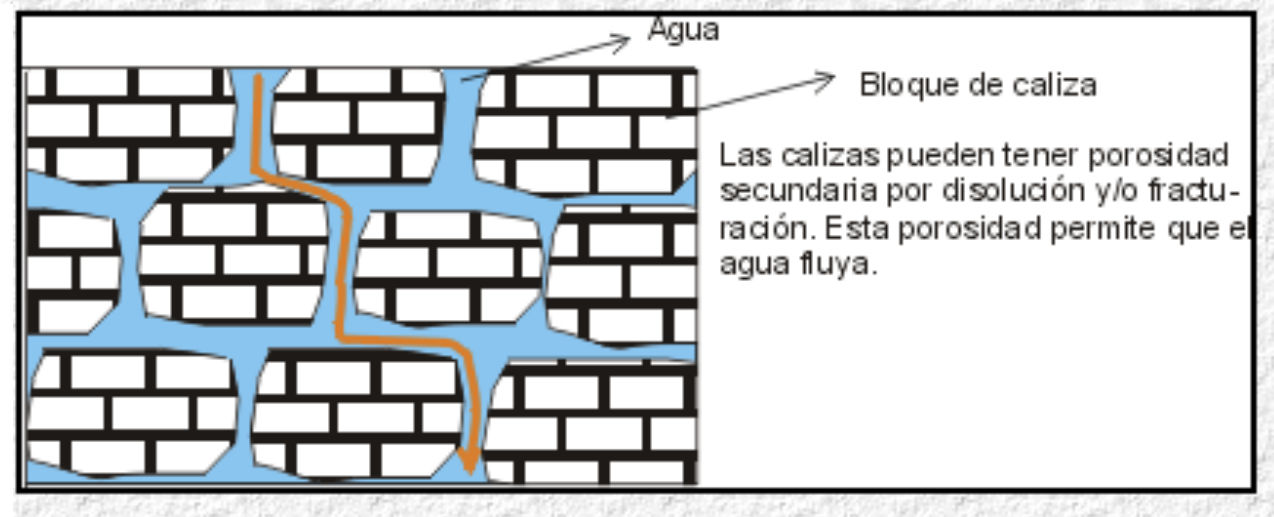
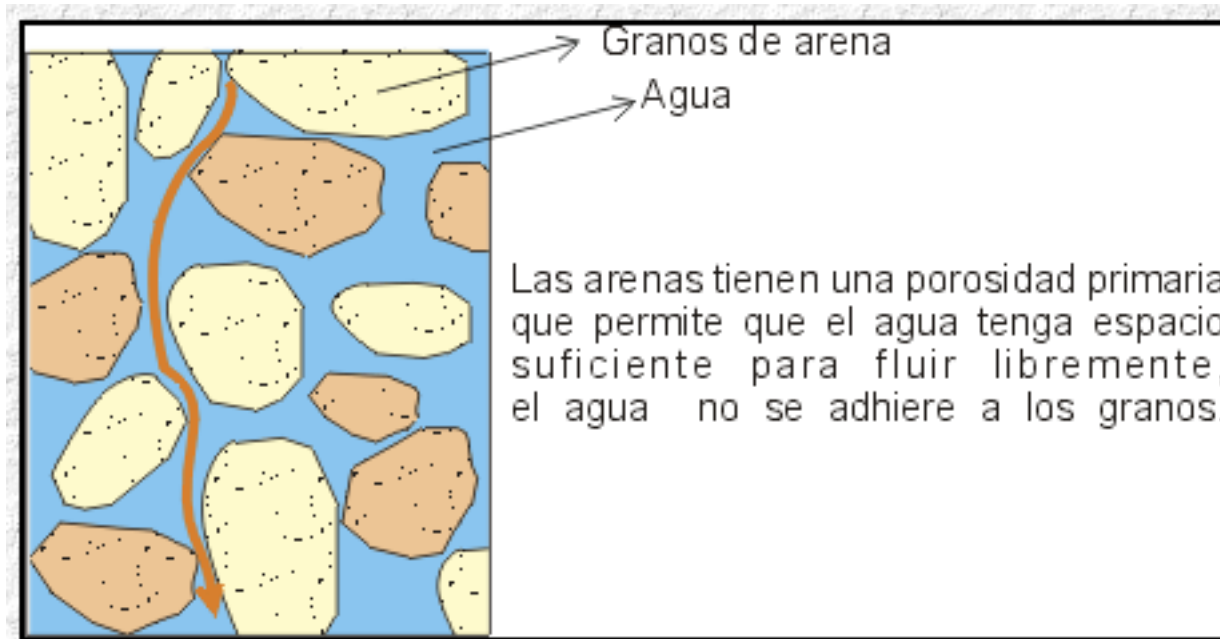


Porosidad intergranular



Porosidad por fisuración

Porosidad primaria y secundaria



Factores en la porosidad

Intergranular:

- **porosidad total:** no depende del tamaño de los granos.
- **porosidad eficaz:** depende del tamaño de los granos. Mientras más fino el grano, más difícil la circulación de agua, la retención específica aumenta.

Las dos porosidades se ven afectadas por:

- **heterogeneidad** de los granos (heterometría): granos finos ocupan poros que dejan los gruesos y la porosidad disminuye
- **forma y disposición** de los granos
- **compactación, cementación y recristalización**, que van a ir disminuyendo la porosidad

Factores en la porosidad

Por fracturación:

- **porosidad total y porosidad eficaz:** depende de la historia tectónica de la zona y de la litología.
- Es decir: de cómo los tipos de roca han respondido a los esfuerzos.
- En este tipo de porosidad es determinante la posible **disolución** en la zona de fractura; o en sentido contrario, el **relleno** de la fisura o fractura por minerales arcillosos o precipitación de otros minerales

Valores estimados de la porosidad (%), según Sanders (1998)

	total	eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fraturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Permeabilidad y transmisividad

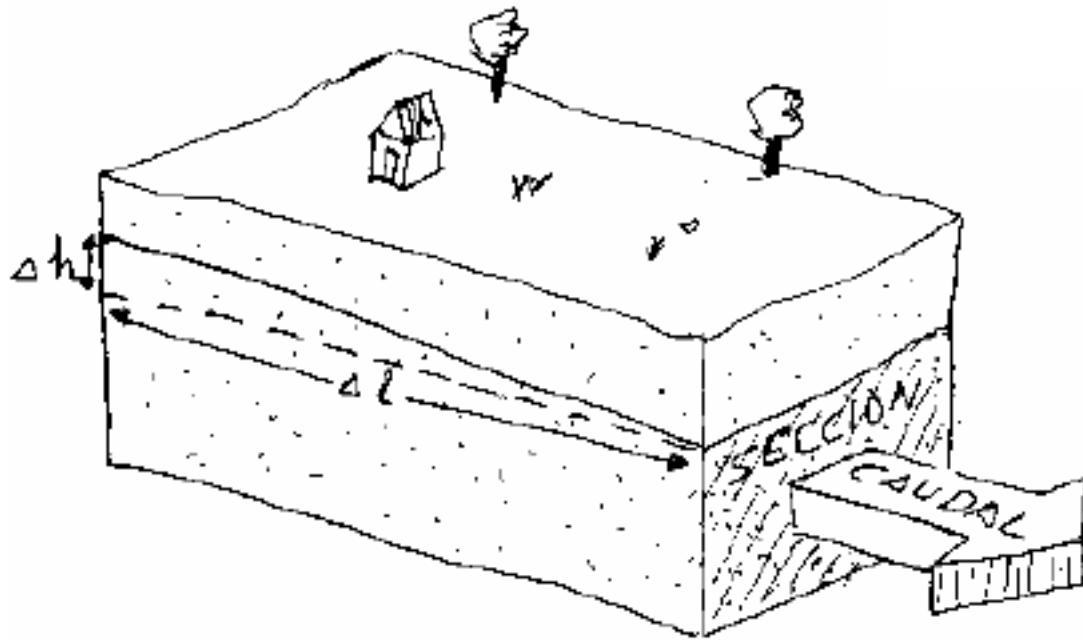
Permeabilidad:

- la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso, el agua
- En el caso de las arcillas podríamos decir que son unos materiales muy porosos pero poco permeables, porque sus huecos no están conectados entre sí.
- En hidrogeología, ecuación da un concepto más preciso de permeabilidad o conductividad hidráulica, K , que es la constante entre el caudal y la gradiente

Caudal por unidad de sección = $K * \text{Gradiente hidráulico}$

- Ecuación enuncia a la Ley de Darcy.

Permeabilidad



El caudal que atraviesa el medio poroso perpendicularmente a la sección señalada es linealmente proporcional al gradiente $\Delta h / \Delta l$

Caudal por unidad de sección = K * Gradiente hidráulico

$$\frac{\text{Caudal (m}^3/\text{d)}}{\text{Sección (m}^2\text{)}} = K * \frac{\Delta h \text{ (m)}}{\Delta l \text{ (m)}}$$

Permeabilidad

- El gradiente o la pendiente, es la que obliga al agua a circular a través del medio poroso
- A mayor gradiente circulará mayor caudal
- Las unidades de K, son de velocidad:
 - $K = [L/T]$
 - $K [=] \text{ m/s; cm/s; o m/d (más utilizado)}$

Permeabilidad

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)

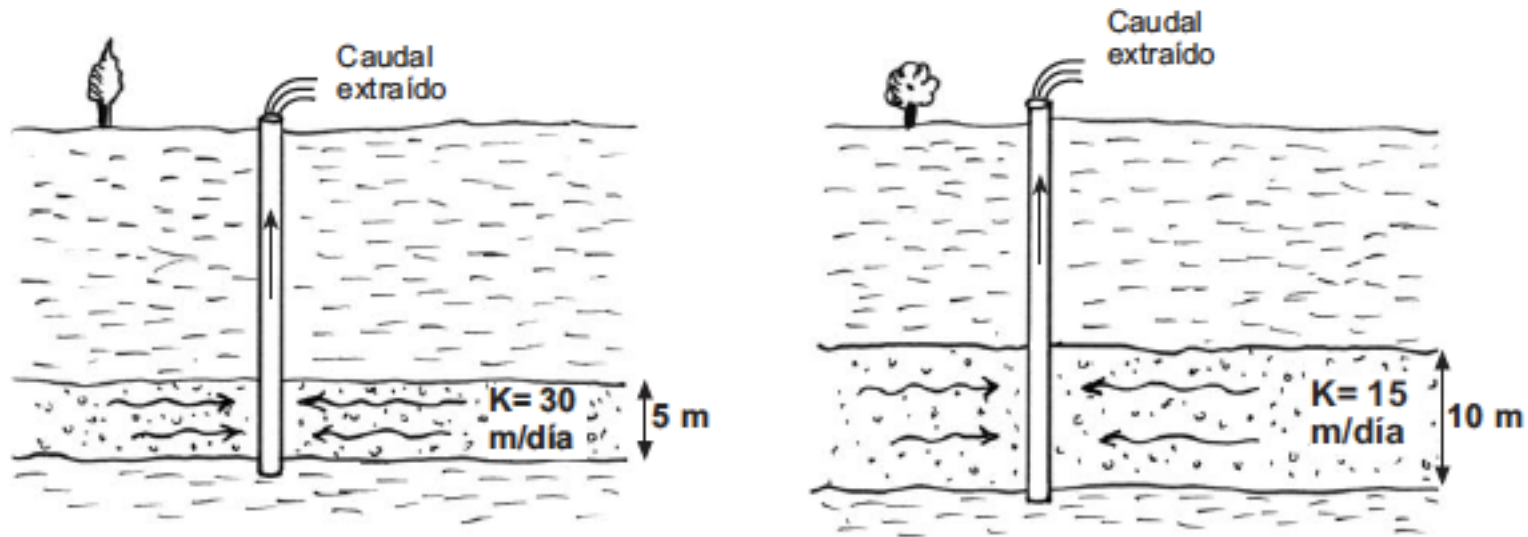
		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10^5	100 a 10^6	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1a 50				
	Arena fina	0,02a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10^{-4} a 2	10^{-4} a 1	10^{-4} a 1	0,001 a 0,1	10^{-4} a 1
	Arcilla	10^{-6} a $4 \cdot 10^{-4}$	10^{-7} a 10^{-3}		10^{-6} a 10^{-3}	10^{-6} a 10^{-3}
	Arcilla marina inalterada	10^{-7} a $2 \cdot 10^{-4}$		10^{-11} a 10^{-7}		
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10^7
	Calizas, dolomías	10^{-4} a 0,5	0,001 a 0,5	10^{-4} a 1		10^{-4} a 1
	Areniscas	$3 \cdot 10^{-5}$ a 0,5	10^{-5} a 1	10^{-5} a 1		
	Argilitas (siltstone)	10^{-6} a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10^{-8} a $2 \cdot 10^{-4}$	10^{-8} a 10^{-4}	10^{-4} a 10^{-8}		10^{-4} a 10^{-8}
	Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10^{-4} a 1			

Permeabilidad

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10^{-6} a 10^{-3}			10^{-6} a 10^{-3}
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10^6
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10^{-9} a 10^{-5}	10^{-9} a 10^{-5}	10^{-9} a 10^{-5}		10^{-9} a 10^{-5}
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10^{-5} a 1	0,0005 a 20		10^{-5} a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Transmisividad



- En el gráfico, los dos acuíferos van a proporcionar el mismo caudal: uno tiene la mitad de la permeabilidad (K) pero el doble de espesor que el otro
- **TRANSMISIVIDAD (T):** es la cantidad de agua que transmite un material en una unidad de superficie por unidad de tiempo.

Transmisividad

La **transmisividad** es el parámetro que indica la facilidad del agua para circular **horizontalmente** por una formación geológica, en una combinación de la permeabilidad y el espesor del acuífero

$$\text{Transmisividad} = \text{Permeabilidad} * \text{Espesor}$$

$$T = K * b$$

$$\text{Unidades: } [L/T] * [L] = [L^2/T] = \text{m}^2/\text{d}; \text{ cm}^2/\text{d}$$

$$\text{En ejemplo anterior: } T = 30 \text{ (m/d)} * 5 \text{ (m)} = 150 \text{ m}^2/\text{d}$$

Tipos de acuíferos

Acuíferos libres:

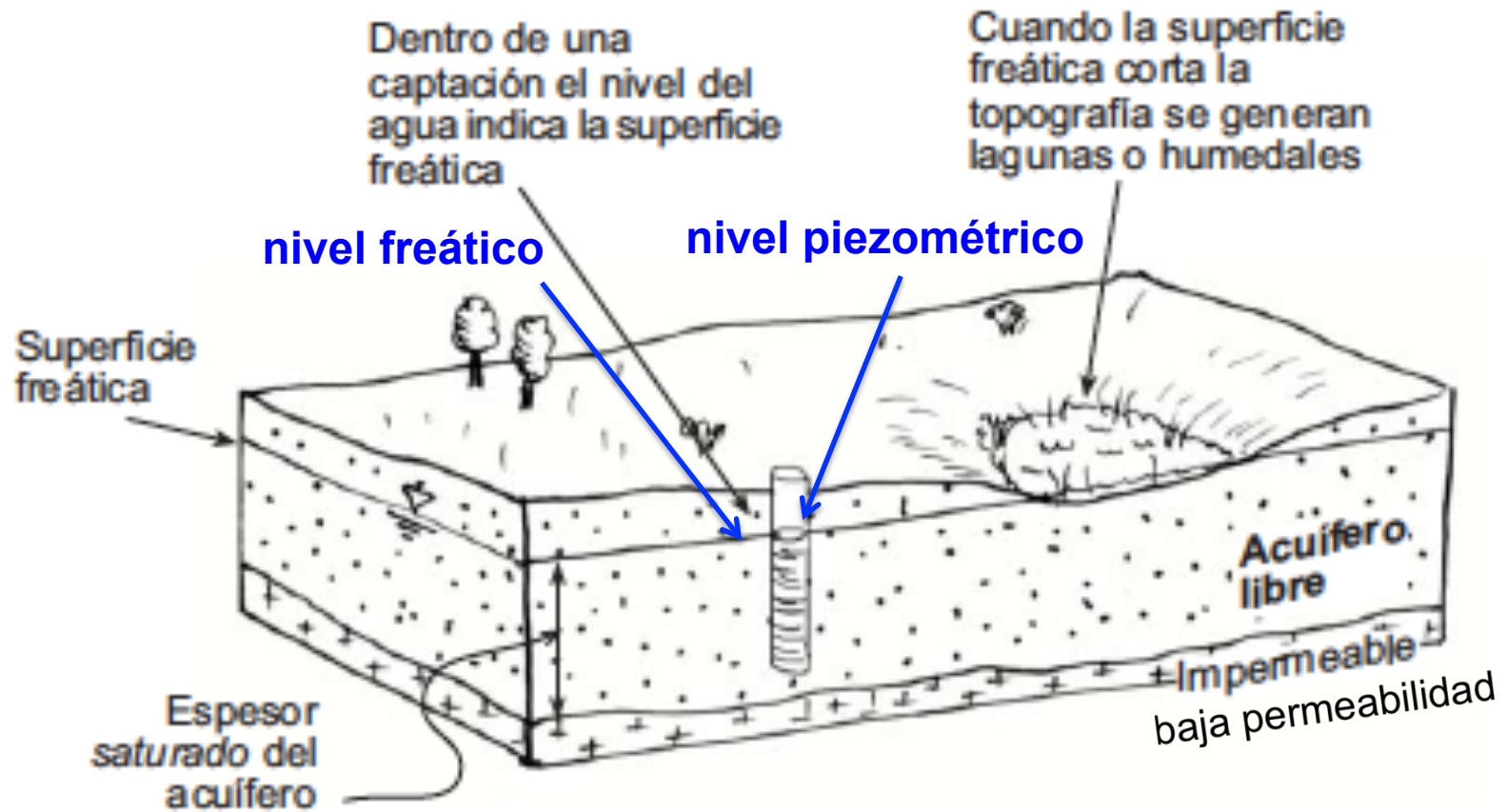
- Aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua y se encuentra a presión atmosférica.
- El agua se encuentra rellorando los poros o fisuras por gravedad (simil a una piscina, donde agua llena el recipiente que la contiene)
- La superficie donde llega el agua será el **nivel freático o superficie freática** y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material de baja permeabilidad.

Tipos de acuíferos

Acuíferos libres:

- En estos acuíferos, al perforar pozos que los atraviesen total o parcialmente, el agua alcanza un nivel que sería el mismo que tendría dentro de la formación geológica, es decir el **nivel freático** (nivel real) en ese punto, que coincide con el **nivel piezométrico** (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica)
- **El espesor saturado**, será menor o igual que el del estrato o formación geológica correspondiente

Acuífero libre



Tipos de acuíferos

Acuíferos confinados (o artesianos):

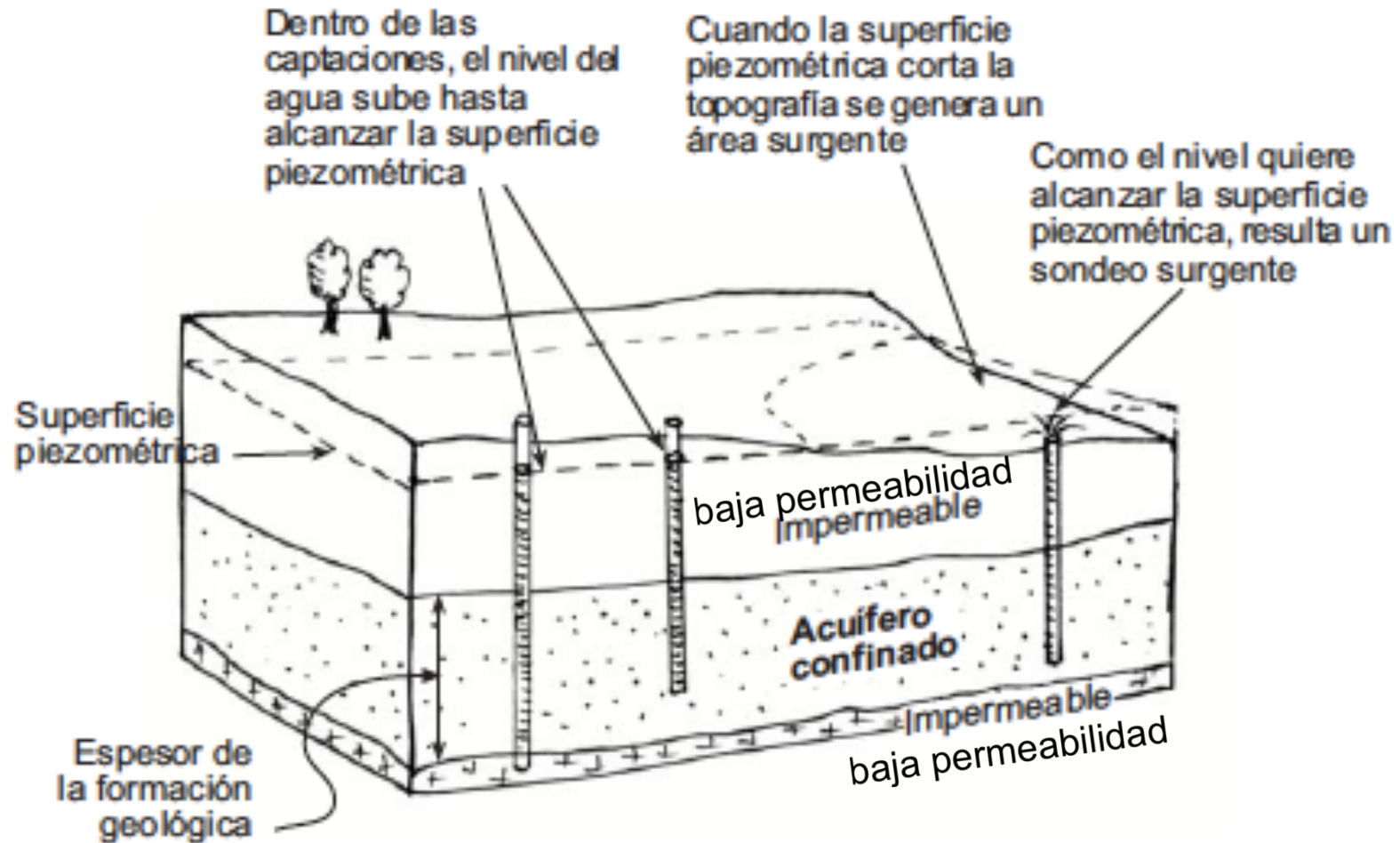
- En estos acuíferos, el agua se encuentra a presión, superior a la atmosférica y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente
- Están sellados por materiales impermeables (baja permeabilidad) que no permiten que el agua ascienda hasta igualar su presión a la atmosférica
- Al extraer agua del acuífero, éste NO se vacía.
- La extracción procede a la descompresión del agua y en menor medida de la compresión de la matriz sólida
- Si la compresión es notoria y no es reversible, llegarán a producirse asentamientos y subsidencia del terreno

Tipos de acuíferos

Acuíferos confinados (o artesianos):

- Por estar a presión, al perforar pozos que atraviesen el límite superior del material que constituye el acuífero, se observará que el nivel del agua asciende muy rápido hasta que se estabiliza en el nivel piezométrico (en un punto)
- La **superficie virtual** formada por puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero se denomina superficie piezométrica que no coincide con la superficie freática que tenía el acuífero en forma natural
- Podrán darse **pozos surgentes artesianos** si el nivel del agua queda por encima del nivel topográfico y **pozos artesianos** si el nivel se estabiliza por debajo de la cota del terreno.

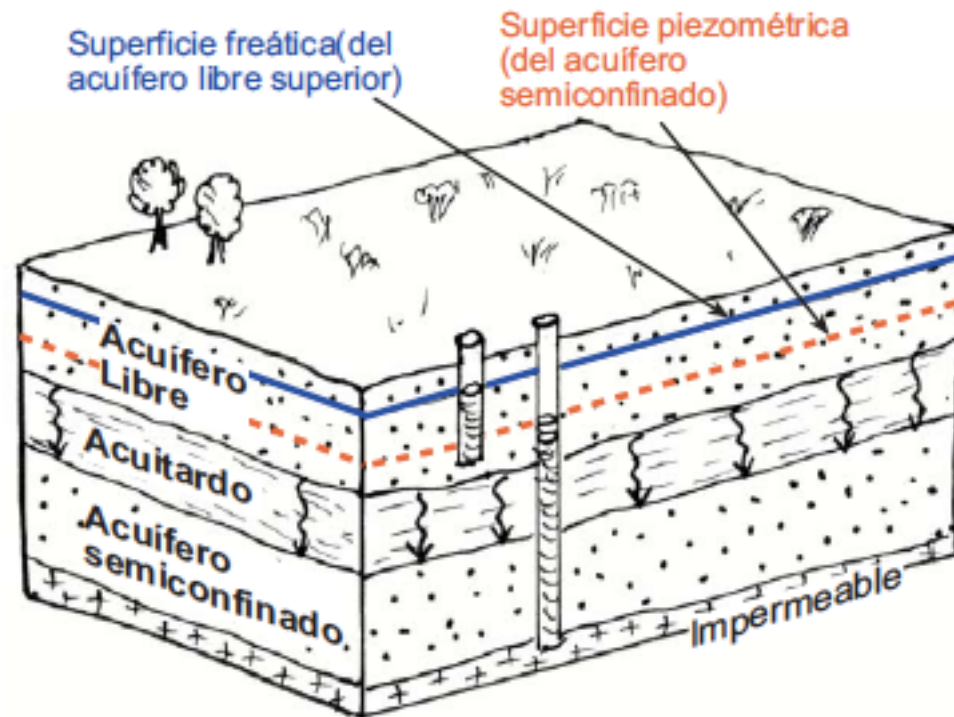
Acuífero confinado



- La **surgencia** refleja la altura de la presión del agua, no es sinónimo de productividad, pues el análisis del caudal, puede demostrar que no es explotable

Otros tipos de acuíferos

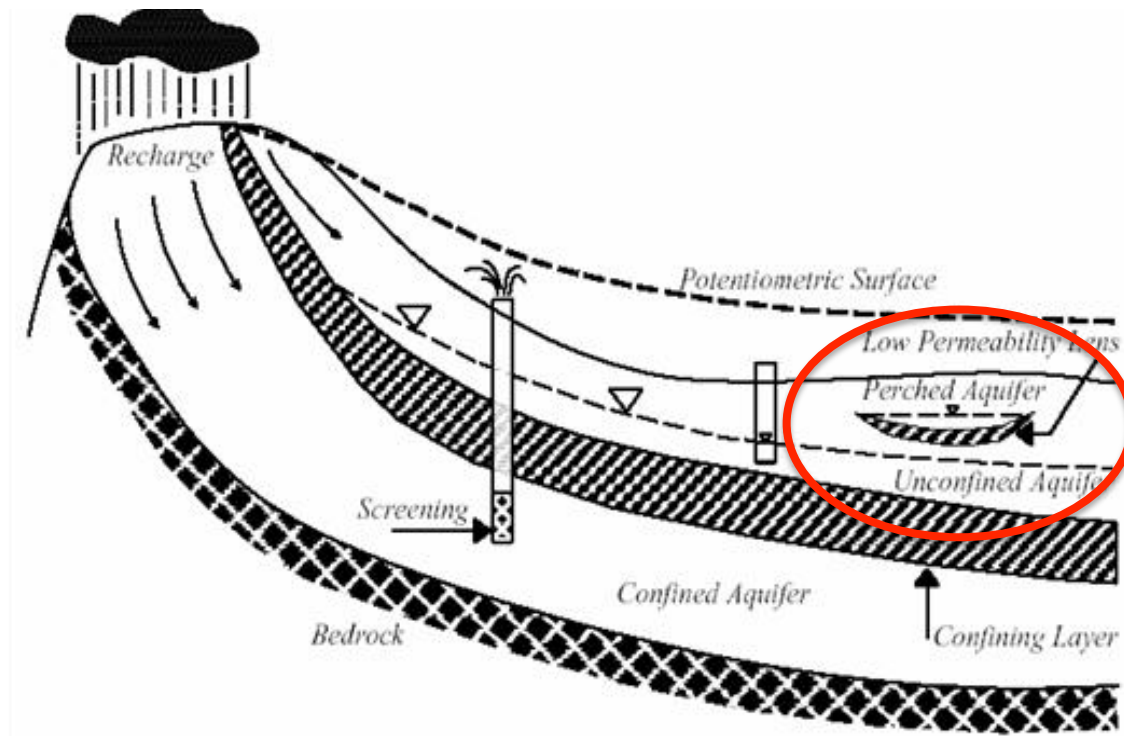
Acuíferos semi-confinados: acuíferos a presión (por tanto entran en la categoría de confinados) pero que tienen una capa algo permeable (acuitardo), que permite la transmisión de agua por filtraciones verticales (en inglés: leaky aquifers), que alimentan lentamente al acuífero principal



Otros tipos de acuíferos

Acuífero colgado (perched aquifer): es un acuífero libre que se forma sobre la superficie freática.

Hay una zona no saturada debajo de la capa de baja permeabilidad donde se formó el acuífero colgado



Transmisividad en acuíferos confinados y libres

- En acuíferos **confinados**, el espesor del acuífero es constante, por lo que la transmisividad es constante
- En acuíferos libres, el espesor de la capa saturada varía con las oscilaciones de la superficie freática, por lo que varía también la transmisividad

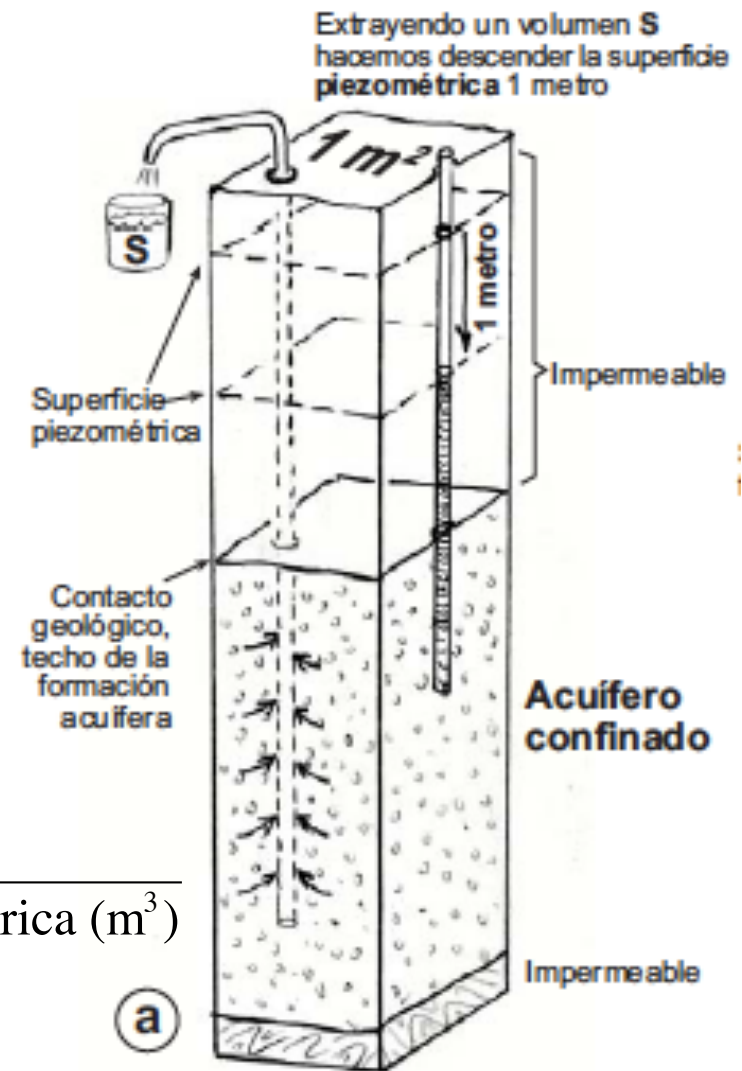
Coeficiente de almacenamiento

- El volumen de agua que proporcionan los acuíferos **libres**, se puede calcular usando la **porosidad eficaz**
- En acuíferos **confinados**, este concepto no es suficiente, pues cuando proporcionan agua, continúan saturados, solo disminuye la presión.
 - La porosidad eficaz no indica cuanto puede almacenar el acuífero.
 - Se requiere un parámetro que indique el agua liberada al disminuir la presión en el acuífero
 - Coeficiente de almacenamiento

Coeficiente de almacenamiento

- El **coeficiente de almacenamiento** (S , en inglés: Storativity) es el volumen de agua liberada por una columna de base, la unidad de superficie (1m^2) y de altura, toda la columna del acuífero, cuando el nivel piezométrico desciende una unidad (1m)
- La definición puede escribirse como

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado (m}^3\text{)}}{\text{Volumen total que ha bajado la superficie piezométrica (m}^3\text{)}}$$



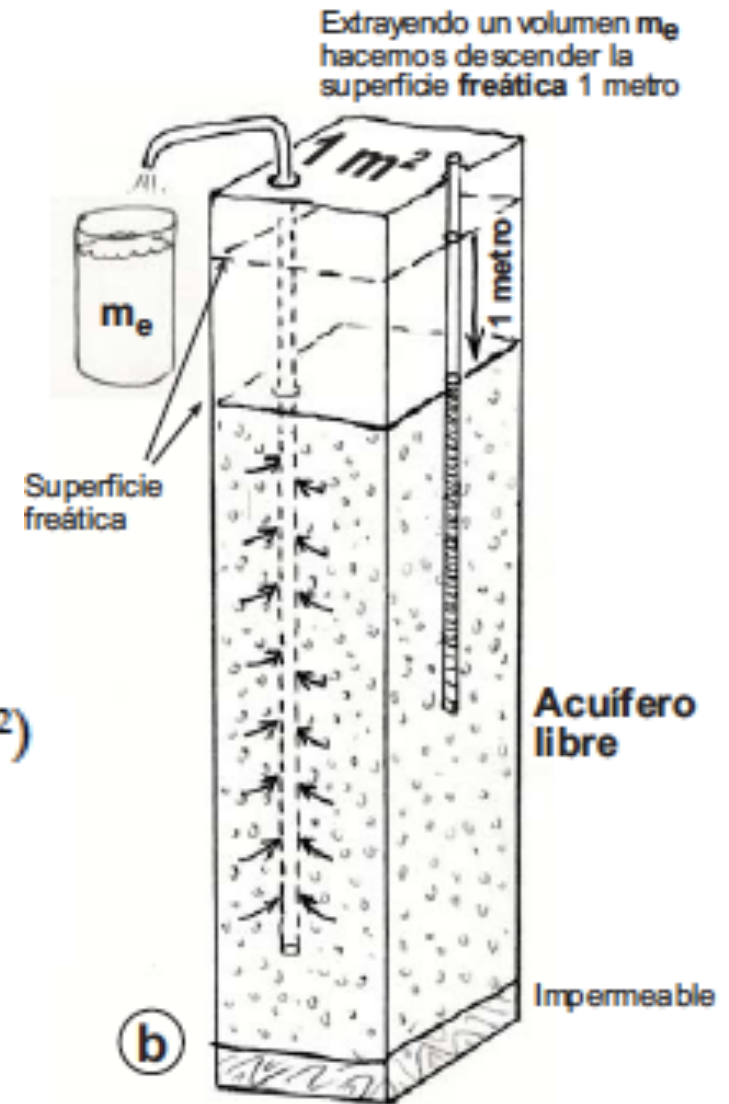
Coeficiente de almacenamiento

- En un acuífero **libre**, $S = m_e$.
- Si se considera 1 m^2 de acuífero libre y desciende 1 m la superficie freática $\Rightarrow V$ agua extraído será igual a la porosidad eficaz (m_e)
- Unidades: adimensional (V/V)
- Valores típicos:

Acuíferos libres: $0,3$ a $0,01$ ($3 \cdot 10^{-1}$ a 10^{-2})

Acuíferos semiconfinados: 10^{-3} a 10^{-4}

Acuíferos confinados: 10^{-4} a 10^{-5}



Coeficiente de almacenamiento

- El **almacenamiento específico** (S_s , specific storage) es el volumen liberado por 1 m³ de acuífero (no por toda la columna de acuífero), al descender 1 m la superficie piezométrica

$$S_s = \rho_w g (\beta_p + n \beta_w)$$

ρ_w = densidad del agua

g = gravedad (9,81 m/s²)

n = porosidad

β_p = compresibilidad vertical de la matriz rocosa

β_w = compresibilidad del agua

La unidad de la compresibilidad es la inversa de la presión

β_w para agua subterránea = $4.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ ft}^2/\text{lb}$

Table 4.1 Vertical Compressibility

Material	Coefficient of Vertical Compressibility		
	ft ² /lb	m ² /N	bars ⁻¹
Plastic clay	1×10^{-4} – 1.25×10^{-5}	2×10^{-6} – 2.6×10^{-7}	2.12×10^{-1} – 2.65×10^{-2}
Stiff clay	1.25×10^{-5} – 6.25×10^{-6}	2.6×10^{-7} – 1.3×10^{-7}	2.65×10^{-2} – 1.29×10^{-2}
Medium-hard clay	6.25×10^{-6} – 3.3×10^{-6}	1.3×10^{-7} – 6.9×10^{-8}	1.29×10^{-2} – 7.05×10^{-3}
Loose sand	5×10^{-6} – 2.5×10^{-6}	1×10^{-7} – 5.2×10^{-8}	1.06×10^{-2} – 5.3×10^{-3}
Dense sand	1×10^{-6} – 6.25×10^{-7}	2×10^{-8} – 1.3×10^{-8}	2.12×10^{-3} – 1.32×10^{-3}
Dense, sandy gravel	5×10^{-7} – 2.5×10^{-7}	1×10^{-8} – 5.2×10^{-9}	1.06×10^{-3} – 5.3×10^{-4}
Rock, fissured	3.3×10^{-7} – 1.6×10^{-8}	6.9×10^{-10} – 3.3×10^{-10}	7.05×10^{-4} – 3.24×10^{-5}
Rock, sound	less than 1.6×10^{-8}	less than 3.3×10^{-10}	less than 3.24×10^{-5}
Water at 25°C	2.3×10^{-8}	4.8×10^{-10}	5×10^{-5}

Modified from Domenico and Mifflin (1965), Water Resources Res. 4, p. 563–576. Copyright by Amer. Geophys. Union.

Conversión de unidades de presión:

$$1 \text{ Newton (N)} = 1 \text{ Kg.m/s}^2$$

$$1 \text{ Kg}^* = 9,80665 \text{ N} = 2,02046 \text{ lb}^*$$

Kg* = Kg fuerza; lb* = lb fuerza

Tomado de Schwartz & Zhang (2003)

Ejemplo

- Qué volumen de agua puede extraerse por gravedad de 1 m^3 de material poroso, saturado al 20% y con una porosidad drenable por gravedad de 8%?

Ejemplo

- Un acuífero confinado tiene 200 m de espesor. Si los coeficientes de compresibilidad del agua y del acuífero son $4.8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ y $0,77 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{N}$ respectivamente, y la porosidad eficaz es del 6%.
- Calcular el almacenamiento específico
- Calcular el coeficiente de almacenamiento específico

$$S = S_s * b$$

$$b = \text{espesor del acuífero (m)}$$

Ejemplo

- Si el acuífero del ejemplo anterior tiene un área de 980 Km², calcular:
 - a) Volumen de agua que puede obtenerse bajando el nivel piezométrico una media de 10 m en todo el acuífero

$$V = S * \Delta h * A$$

- b) Qué volumen de agua se debe a la compresibilidad del acuífero y qué volumen a la del agua?

$$S = S_s * b$$

$$b = \text{espesor del acuífero (m)}$$

Subsidencia de terrenos



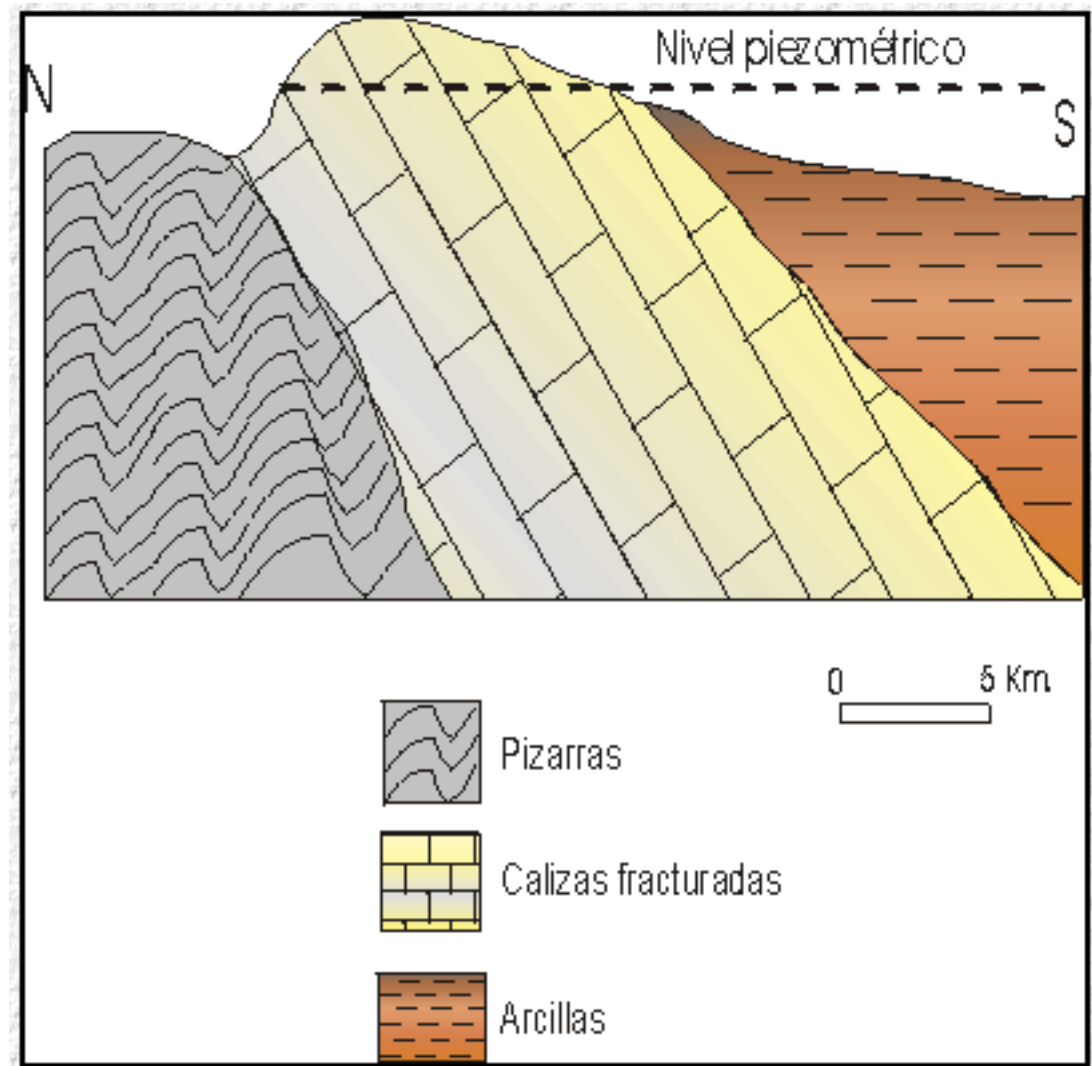
Subsidencia de terrenos



Figura 1. Falla por subsidencia en Salamanca Guanajuato, México.

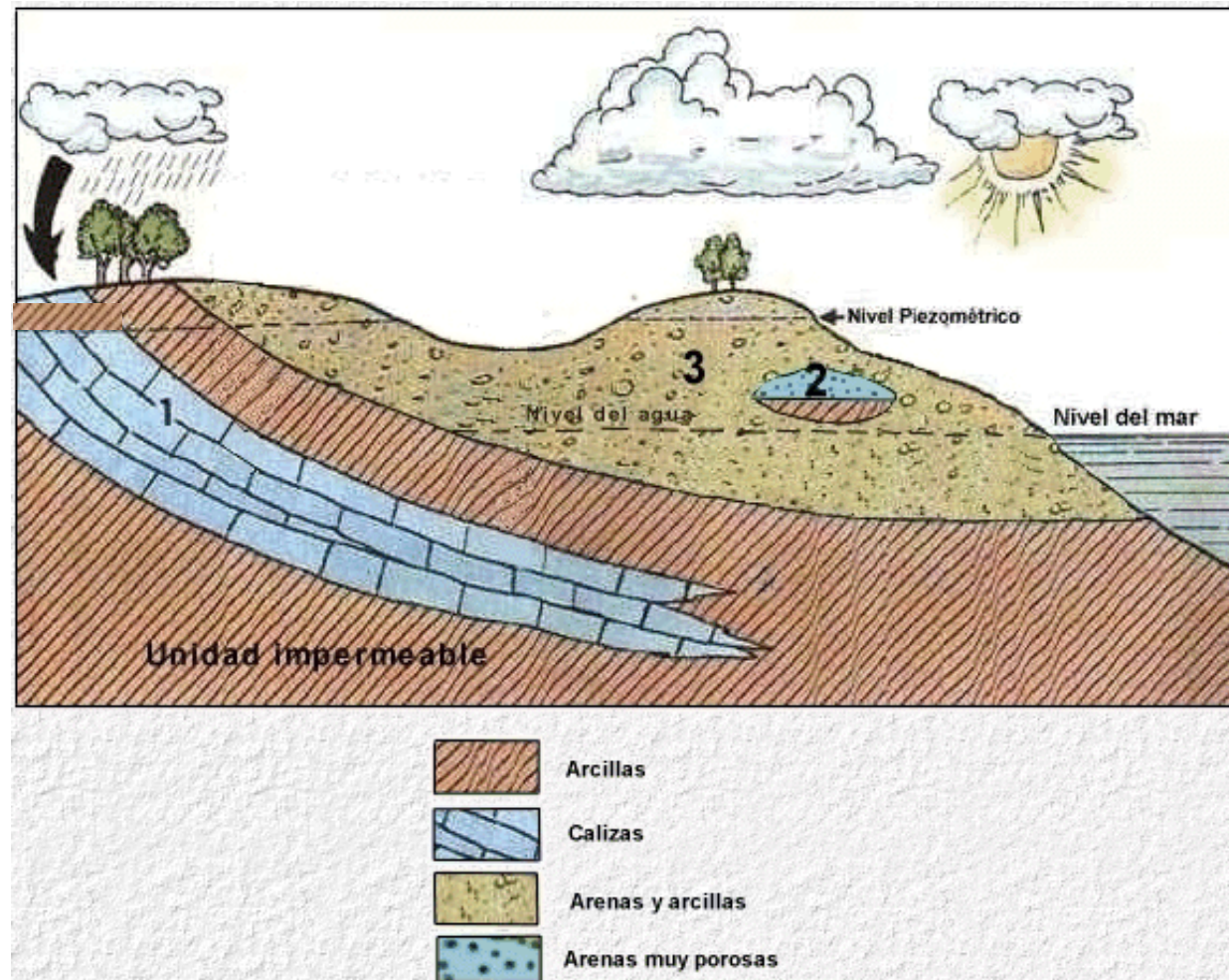
Ejercicios

El corte geológico representa el terreno donde se quiere construir una serie de pozos para una desaladora de agua subterránea, donde lo que interesa es que los pozos tengan el mayor caudal de agua posible. ¿Dónde se construiría el primer pozo para comprobar que el caudal que sale es considerable?



Ejercicios

En el siguiente diagrama se puede ver un corte geológico con diferentes materiales litológicos. ¿Podrías decir cuál de cada una de ellas corresponde a los anteriores tipos de acuíferos citados?



Deber

1. El volumen de una muestra húmeda es 2000 cm^3 . Después de que la muestra ha sido drenada por gravedad, el volumen de la muestra es 1650 cm^3 . Luego de que la muestra ha sido secada en horno, el volumen es 1500 cm^3 . Calcule la porosidad de la muestra y la retención específica, como porcentaje.
2. La transmisividad calculada del análisis del acuífero es $0,0134 \text{ m}^2/\text{s}$ para un acuífero confinado de 13 m de espesor. Calcule la conductividad hidráulica.
3. Un acuífero confinado de 100 m de espesor, está compuesto de grava arenosa densa, con una porosidad del 20%. Estime el rango posible del almacenamiento específico y el coeficiente de almacenamiento

Para una caída total de 100 m en la cabeza hidráulica, en un área de $1 \cdot 10^9 \text{ m}^2$, cuánta cantidad de agua podrá extraerse del almacenamiento?